基于 DPM 模型的水平井水平段沥青质颗粒运移规律数值模拟研究

高晓东[1,2],董平川[1,2],陈舜[1,2],韩要潭[1,2],黄刚[1,2]

(1. 油气资源与探测国家重点实验室,102249 北京;2. 中国石油大学(北京)石油工程学院,102249 北京)

摘　要:针对沥青质颗粒在水平井井筒的沉积问题,本研究采用 Fluent 中的 DPM 模块追踪沥青质颗粒在油管中的运动轨迹,采用 realizable *k-e* 模型对尺寸为 10 ~ 100 μm 的沥青质颗粒在水平井筒内壁的沉积进行了研究。分析了重力、Saffman 力以及阻力作用下,黏度、颗粒尺寸以及流速对沥青质颗粒沉积速率的影响。CFD 模拟结果表明:①层流阶段,沉积速率随着黏度的增大而减小,这主要是因为层流阶段,流体流动较平稳,使得管壁附近速度梯度减小,Saffman 升力降低引起的,而在湍流阶段,当黏度从 0.001 2 Pa · s 增加至 0.012 Pa · s 时,沥青质沉积速率会缓慢增加;当黏度从 0.012 Pa · s 增加至 0.053 Pa · s,沉积速率和沉积百分数会随之下降;②当颗粒直径为 10 ~ 100 μm 时,沥青质颗粒沉积百分数和沉积速率会随着流速的增加而减小;③当速度为 0.3 ~ 2 m/s 时,沥青质颗粒沉积百分数和沉积速率随着颗粒直径的增大而增大。研究结果为水平井井筒中的沥青沉积行为指明了方向,认为合理控制井筒中流体速度、黏度和颗粒直径可作为去除井筒沥青质沉积的有效手段。

关键词:水平井水平段;沥青质颗粒;DPM 模型;黏度;沉积速率

中图分类号:O35　　**文献标志码:**A

Numerical simulation of asphaltene particle transport in horizontal well horizontal section based on DPM model

GAO Xiaodong[1,2], DONG Pingchuan[1,2], CHEN Shun[1,2], HAN Yaotan[1,2], HUANG Gang[1,2]

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, 102249 Beijing, China;
2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), 102249 Beijing, China)

Abstract: To study the problem of asphaltic particles deposition in horizontal wellbore, the DPM module in Fluent was used to track the particle movement in tubing. And the realizable *k-e* model was adopted to investigate the asphaltene aggregates with a size of 10 ~ 100 μm on the inner wall of tubing. The effects of particle size and velocity on the asphaltene particle deposition rate are analyzed when the gravity, saffman lift, and drag forces are exerted on the particles. CFD simulation results show: ① The deposition rate decreases with the increase of viscosity in the laminar flow stage. This is mainly because in the laminar flow

收稿日期:2021-05-20　　**修回日期:**2022-04-21
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 42141009)
通信作者:董平川,教授,博士生导师。E-mail:dpcfem@163.com
引用格式:高晓东,董平川,陈舜,等. 基于 DPM 模型的水平井水平段沥青质颗粒运移规律数值模拟研究[J]. 应用力学学报,2023,40(1):218-224.
GAO Xiaodong, DONG Pingchuan, CHEN Shun, et al. Numerical simulation of asphaltene particle transport in horizontal well horizontal section based on DPM model[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(1): 218-224.

stage, the fluid flow is relatively stable and Saffman lift decreases. The asphaltene deposition rate increases slowly in the range from 0.001 2 Pa · s to 0.012 Pa · s; the deposition rate and percentage decrease when the viscosity increases from 0.012 Pa · s to 0.053 Pa · s in the turbulent stage. ②The deposition percentage and deposition rate of asphaltene particles decrease with the increase of flow rate when the particle diameter is 10-100 μm. ③When the velocity is 0.3-2 m/s, the percentage and deposition rate of asphaltene particles increase with the increase of particle diameter. The analysis shows that reasonable control of wellbore fluid velocity and particle diameter can be an effective means to reduce asphaltic deposition in wellbore.

Key words: horizontal section; asphaltene particle; DPM module; viscosity; deposition rate

在石油工业生产过程中,由于原油温度、压力以及组分的改变,溶解在油中的沥青质稳定性会被打破,沥青质沉淀会从油流中析出,部分沥青质颗粒会黏附在井筒油管内壁,堵塞油流的有效通道,严重降低油井产能,极大地增加了油田的开采成本[1-5]。因此研究井筒沥青质颗粒的沉积特性变得至关重要。

ESCOBEDO 等[6]在建立固体颗粒沉积模型时,考虑了布朗、紊流扩散系数以及沥青质颗粒输送到管壁的惯性效应,以此预测沥青质颗粒在湍流条件下的沉积特性。RAMIREZ 等[7]基于分子扩散和剪切为沥青质颗粒径向扩散竞争机制的假设,利用多相多组分流体动力学模型预测生产井的沥青质颗粒沉积,该模型预测了沥青质沉积质量剖面随时间和位置的变化规律,同时还认为径向温度梯度是沥青质颗粒运移到管壁的原因。但是 ESKIN[8], JAMIALAHMADI[9]等认为沥青质颗粒在管壁上的沉积速率是由化学反应机理控制,而并非是温度梯度的控制,并在方程中加入指数项以考虑温度对化学反应的影响。李兆敏等[10]认为沥青质颗粒向井壁运移的动力主要是分子扩散力和惯性力,并且研究了流速、粒径等参数对沉积速率的影响。SOULGANI[11]建立了反应、扩散受限聚集的沥青质聚集动力学的通式,研究了重力、阻力、浮力对沥青质颗粒平衡作用。SEYYEDBAGHERI 等[12]利用 Fluent 软件中 Eulerian-Lagrangian 方法模拟了 3 维油管中沥青质聚集颗粒的沉积特性,模拟结果显示,沥青质颗粒沉积速度与颗粒数目以及管壁粗糙度无关,沉积通量会随着流速的增加而降低。综上所述,以往的数值研究大多针对的是垂直井筒内管壁沥青质聚集体的沉积行为,鲜少有关于水平井井筒的颗粒沉积行为的研究报道;另外学者们在用 CFD 软件模拟过程沥青质沉积过程时,并未考虑原油黏度对沥青质沉积速率的影响。

为此,本研究采用 Lagranian 方法建立沥青质聚集体的沉积数学模型,利用单向耦合的方法研究水平井井筒内壁的沥青质颗粒沉积,其中采用 DPM 模块追踪油管中颗粒运动轨迹,利用 realizable k-e 模型模拟井筒中充分发展的湍流条件。研究了颗粒直径、速度以及黏度对沥青质沉积百分数以及沉积速率的影响,该研究结果对水平井井筒沥青质沉积的去除具有指导意义。

1 数值模型描述

1.1 沥青质聚集体沉积数学模型

依据 Lagranian 方法跟踪颗粒[13],模拟沥青质颗粒在水平井筒中的运动情况,对于沥青质颗粒的性质作以下假设:①沉淀运动过程中,密度保持不变;②颗粒为刚体,不会发生变形;③颗粒为质点,忽略颗粒-颗粒之间的相互作用。根据 Eulerian-Lagrangian 模型,建立液相的连续方程与动量守恒方程[14]。

油相连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(a_o\rho_o) + \nabla\cdot(a_o u_o \rho_o) = 0 \tag{1}$$

油相动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(a_o u_o \rho_o) + \nabla\cdot(a_o u_o u_o \rho_o) = -a_o\nabla p + \nabla\cdot\tau_o + a_o\rho_o g + F \tag{2}$$

式中:a_o为液相的体积浓度分数,%;ρ_o表示油相的密度;∇表示哈密顿算子;u_o表示油相的速度,m/s;p表示压强,Pa;τ_o 表示应力张量;F 表示两相间的体积作用力,N。

两相间的体积作用力 F 主要包含重力、浮力、阻力、Saffman 升力、虚拟质量力、压力梯度力、静电力、Basset 力和 Magnus 力等,由于后面 5 个作用力在数

量级上相对较小,一般可忽略[15]。颗粒使用 Lagranian 轨道模型,但当颗粒浓度稀薄时(体积分数 < 10% ~12%),只考虑流场对颗粒的作用。因此,根据牛顿第二定律,单个颗粒运动的动力学沉积方程为

$$m_p \frac{du}{dt} = G + F_d + F_l \tag{3}$$

式中:F_d表示沥青质颗粒的阻力,N;G 表示重力,N;m_p表示沥青质聚集体的质量,kg;u 表示流体的速度,m/s;F_l表示 Saffman 升力,N;下标 p 表示单个颗粒。

1)阻力

沥青质颗粒在流动过程中受到的阻力是由颗粒表面的压力和剪切力引起的[16]。阻力通常与颗粒尺寸、形状以及流速大小及方向相关,其相关式可以表示为

$$F_d = \frac{\pi d_p^2 \rho_f (u_r - u_p)^2 C_D}{8C_c} \tag{4}$$

其中:C_c指的是 Cunningham 修正系数;d_p指的是颗粒尺寸,m;u_r指的是 r 方向流体的速度,m/s;u_p表示 r 方向颗粒的速度,m/s;C_D表示曳力系数。

曳力系数可以表示为

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p}, & Re_p < 1 \\ \frac{24}{Re_p}(1 + 0.15Re_p^{0.687}), & 1 < Re_p < 1\,000 \\ 0.44, & Re_p > 1\,000 \end{cases} \tag{5}$$

2)Saffman 升力

油流中的沥青质颗粒由于剪切作用,分散的沥青质颗粒会受到垂直于流动方向的升力,促使颗粒获得动量,随着油一起运动[17]。利用 Saffman 方程计算了剪切力对颗粒的作用大小[18-19]。

$$F_L = 1.615 \rho v^{1/2} d_p^2 (v - v_p) |\gamma|^{1/2} \tag{6}$$

其中:v 为流体的运动速度,m/s;γ 表示沥青质颗粒在随油流动过程中所受到的剪切速率,m/s。

1.2 物理模型

本小节研究的水平井筒模型来自文献[20],内径 70 mm,长度 2 000 mm,具体模型如图 1 所示。由于原油流动是在充分发展的湍流条件下进行的,为消除入口效应的影响,首先在足够长的三维水平井筒中模拟原油流动,然后将输出结果用于研究水平井筒的入口油流的初始阶段。

由于本研究主要是模拟沥青质颗粒在油管壁面的沉积情况,因此为了更真实地模拟管壁的复杂流场以及沥青质颗粒在管壁处的沉积过程,本研究利用 Proximity and Curvature 方法在油管壁面设置了 10 层精细网格,节点数约 72 万,网格数约为 182 万,既能保证连续油流相的仿真精度,又可避免因网格尺度偏小引起 DPM 模型计算出错的问题,三维水平井筒物理模型如图 2 所示。

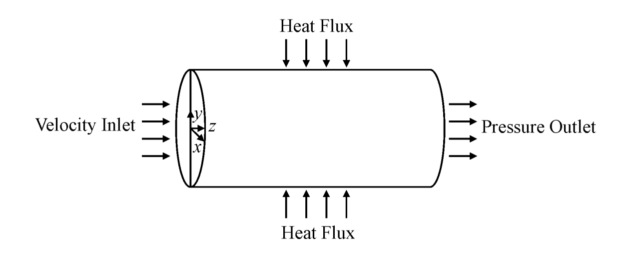


图 1　物理模型

Fig. 1　Physical model

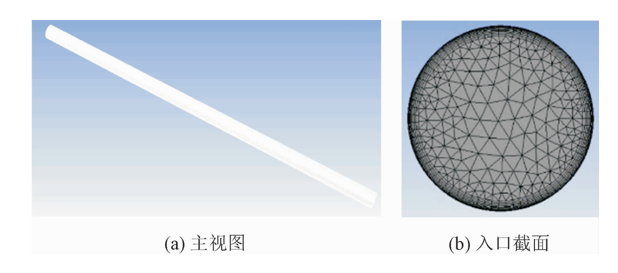


图 2　水平井筒物理模型

Fig. 2　The physical model of horizontal wellbore

为了对网格数量进行独立性验证,本研究将网格数量增加至 511 万,统计了油管内壁沥青质颗粒的沉积数量,将其沉积数目与 182 万网格时的沥青质颗粒进行对比,如表 1 所示。由表格可看出,相对于 182 万网格,误差稳定在 6.1% 左右,考虑到建模时,运行时间随网格尺寸的增加而显著增加,故本研究选择节点数为 72 万,网格数为 182 万的模型。

表 1　网格数目敏感性分析

Tab. 1　The sensitivity analysis of mesh number

节点数	网格数	沉积颗粒数	误差/%
268 064	758 342	5 717	36.6
913 259	3 074 764	4 448	6.1
1 430 233	5 115 943	4 041	6.2

1.3 边界条件设置

本研究在计算过程中,湍流模型采用 Realizable k-e 模型,固体颗粒的追踪采用 Fluent 中的 DPM 离散相模块,沥青质聚集颗粒沿入口垂直面均匀注入,

速度与油流的速度保持一致。在模拟过程中主要考虑重力、阻力以及 Saffman 升力,入口、出口设为逃逸型边界(escape),管壁设为捕集型边界(trap)。另外,入口压力为 30 MPa,出口压力为 29.5 MPa;温度为 50 ℃。其中,油为连续相,沥青质颗粒为分散相,详细参数如表 2 所示。

表 2 模拟参数设定

Tab. 2 The simulation parameters

参数	数值
原油密度/(kg·m^{-3})	866
沥青质密度/(kg·m^{-3})	1 100
原油黏度/(Pa·s)	0.001 2,0.012,0.06,0.12,1.2
入口流速/(m·s^{-1})	0.3,0.5,1.0,1.5,2.0
颗粒直径/μm	10 ~ 100

2 模拟结果分析

本研究引入沥青质颗粒沉积速率和颗粒沉积百分数来表示水平井筒内部颗粒的沉积速度的快慢。

1)颗粒沉积速率

颗粒沉积速率,是描述固体表面颗粒沉积特性的有效物理参数,其表达式为[21-22]

$$V_d = \frac{J}{C_\infty} = \frac{U_{mean}A}{DL}\ln\left(\frac{N_{inject}}{N_{trap}}\right) \tag{7}$$

其中:J 表示为单位时间内颗粒运移到管壁的质量通量;C_∞ 表示颗粒的浓度,kg/m^3;U_{mean} 表示油流的平均速度,m/s;A 表示井筒的横截面积,m^2;D 表示井筒的直径,m;L 表示井筒的长度,m;N_{trap} 表示水平井筒内壁捕获的沥青质聚集体的个数;N_{inject} 表示入口段注入的沥青质聚集体的个数。

通常用无量纲的颗粒沉积速度和无量纲弛豫时间标准颗粒的沉积速度[23],其中无量纲表达式为

$$V_d^{\ +} = \frac{J}{C_\infty u^*} \tag{8}$$

其中 u^* 表示流体剪切速度,可由式(9)来计算。

$$u^* = U_{mean}\sqrt{\frac{f}{2}} \tag{9}$$

其中 f 表示范宁常数,可以表示为

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -3.6\log\left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{k_s}{3.7D}\right)^{1.11}\right] \tag{10}$$

沥青质颗粒沉积通量可用下式来计算。

$$J = V_d S_p C_\infty \tag{11}$$

2)颗粒沉积百分数

颗粒沉积百分数表示水平井筒管壁上沥青质聚集颗粒捕获情况。其表达式为

$$\eta = \frac{N_{trap}}{N_{inject}} \times 100\% \tag{12}$$

另外,本研究 Fluent 模拟过程中,认为残差曲线控制住 10^{-5} 以下时,为合理的范围内,属于收敛。

2.1 流场分析

1)速度场分布

本研究通过数值模拟分析了流速为 2.0 m/s,颗粒直径范围为 10 ~ 100 μm 时,油流在直径为 70 mm,长为 2 000 mm 的水平井筒内速度分布情况,其结果如图 3 所示。

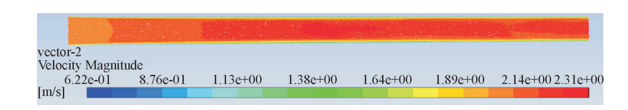


图 3 水平井筒内速度场分布

Fig. 3 Schematic of velocity field distribution

从图 3 可以看出,水平井筒中的油样在径向流动过程中,流体速度是呈正态分布趋势的,具体表现为井筒中间油流速度最大,壁面两端的速度最小,且随着流体入口的速度增加,井筒内的最大流速会向管壁延伸,致使管壁附近出现较大的速度梯度,越靠近出口速度梯度越明显。这是因为随着速度的增加,颗粒在管壁附近受到 Saffman 升力会增加,从而会出现速度梯度增大。

2)压力场分布

图 4 为油样流速为 0.5 m/s,沥青质颗粒尺寸为 10 ~ 100 μm 时水平井筒内部的压力分布图。从图中可以看出,沥青质颗粒随油流从入口运动至出口时,整个水平井筒的压力下降速度变化很小,这表明压力对流场的影响作用较小。

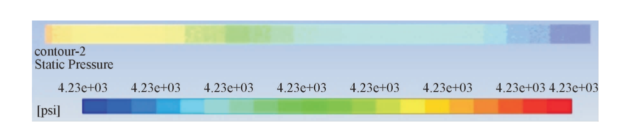


图 4 水平井筒内压力场分布

Fig. 4 Schematic of pressure field distribution

3)颗粒轨迹

图 5 为流速为 2.0 m/s,颗粒直径范围为 10 ~ 100 μm 时,沥青质颗粒在水平井筒内的颗粒追踪轨迹图。从图中可以看出,由于湍流作用,一部分壁面的颗粒会在壁面发生反弹,从而偏离原来的运动轨迹;另一部分沥青质颗粒会沉积到水平井筒壁面(红

色方框标记)，经过一段时间，沉积层厚度会逐渐累积，最终部分堵塞油流通道。

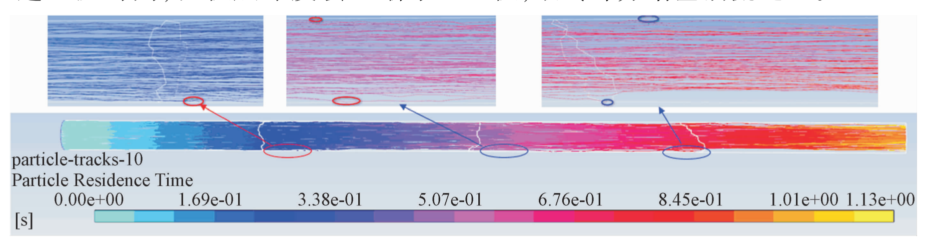


图 5　水平井筒内颗粒运动分布

Fig. 5　Schematic of particle moving field distribution

2.2　黏度对颗粒沉积速率的影响

黏度是通过雷诺数的变化来影响井筒中沥青质颗粒沉积的。本研究分别模拟了流速为 0.5 m/s，颗粒尺寸为 10 ~ 100 μm 时，5 种黏度 0.001 2、0.012、0.06、0.12、1.2 Pa · s 下沥青质颗粒沉积，其沉积百分数和沉积速率如图 6 ~ 图 7 所示。

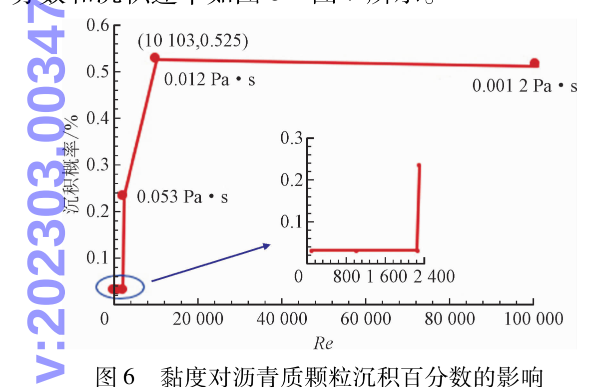


图 6　黏度对沥青质颗粒沉积百分数的影响

Fig. 6　The effect of velocity on deposition percentage

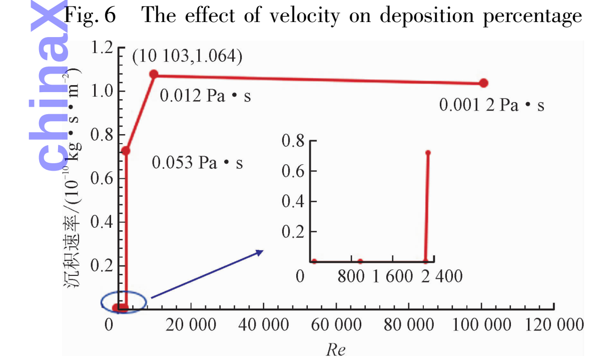


图 7　黏度对沥青质颗粒沉积速率的影响

Fig. 7　The effect of velocity on deposition rate

在层流阶段($\mu \geqslant 0.053$ Pa · s，$Re \leqslant 2\ 300$)，沉积百分数和速率随着黏度的增大而减小，这是因为随着原油黏度的增加，流体的流动逐渐变得平稳，管壁附近的流体梯度会逐渐降低，致使 Saffman 升力逐渐减小，从而导致沉积速率降低。在湍流阶段($Re > 2\ 300$)，原油黏度从 0.001 2 Pa·s 增大至0.012 Pa·s 时，油管中原油状态为强湍流，沉积百分数和沉积速率会随之增大，这是因为原油黏度与油样中的沥青质含量呈递减指数关系[24]，黏度越小，原油中沥青质含量越少，从而致使沥青质沉淀量减小。当原油黏度从 0.012 Pa · s 降至 0.053 Pa · s 时，*Re* 会不断减小(从 10 103 降至 2 300)，致使油管中的原油的惯性力减小，使得沉积速率和沉积百分数降低。

2.3　颗粒尺寸对沉积速率的影响

在流速为 2 m/s，黏度为 0.001 2 Pa · s 时，本研究分别模拟沥青质颗粒直径为 10、30、50、70、100 μm时水平井筒内颗粒运移情况，从而得到不同颗粒尺寸下的沉积情况，如图 8 所示。从图 8 可以看出，随着沥青质颗粒尺寸的增加，沉积百分数随之增加，这是因为颗粒粒径的增大，使得颗粒的重力以及 Saffman 升力越来越大，颗粒在水平井筒壁面沉积的趋势会大大增加。图 9 为 5 种颗粒尺寸的沉积速率图，从图中可以看出，当颗粒直径越大，沉积速率越大，这表明重力是大粒径颗粒的主导力。

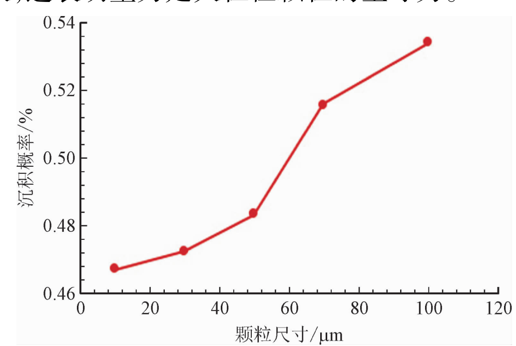


图 8　颗粒尺寸对沉积百分数的影响

Fig. 8　The effect of particle size on deposition percentage

为了进一步验证上述结论，本研究在水平井入口端注入直径范围为 10 ~ 100 μm 沥青质颗粒，通过分析出口颗粒的直径分布，从而确定哪种颗粒沉积的数量最多。图 10 为出口颗粒尺寸分布的饼图。从图 10 中可以看出，出口沥青质颗粒直径范围主要为 10 ~ 80 μm 的颗粒，这表明 90 ~ 100 μm 的沥青质颗粒大部分都沉积在了油管壁面。该结论与张丽珍等[15]研究气固两相流时得出的结论一致，即沥青质

颗粒直径越大,沉积越严重。

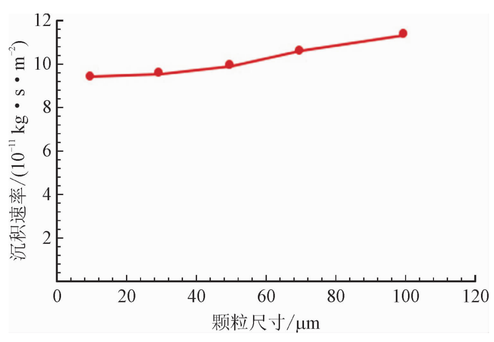


图 9　颗粒尺寸对沉积速率的影响

Fig. 9　The effect of particle size on deposition rate

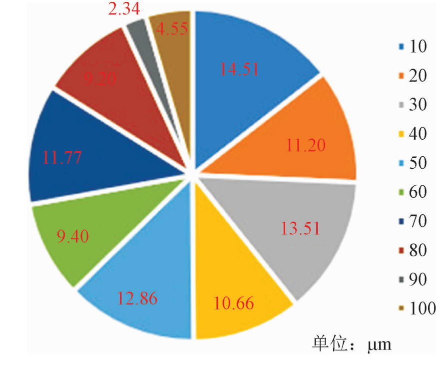


图 10　出口颗粒尺寸分布图

Fig. 10　The particle size distribution in the outlet

2.4　流速对颗粒沉积速率的影响

本研究分别模拟了流速为 0.3、0.5、1.0、1.5、2.0 m/s 时,直径范围为 10～100 μm 的沥青质颗粒在水平井筒中的沉积情况,如图 11～图 12 所示。

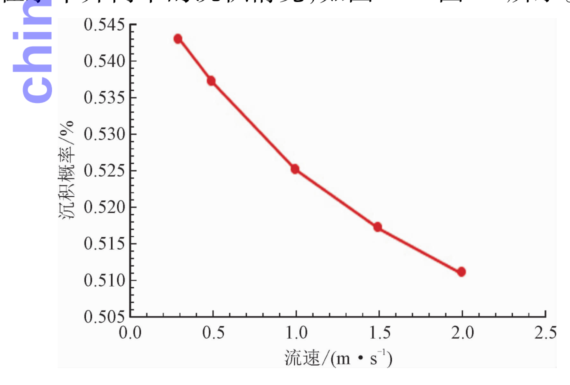


图 11　流速对沉积百分数的影响

Fig. 11　The effect of oil velocity on deposition percentage

从图可以看出,沥青质颗粒沉积百分数和沉积速率会随着流速的增加而减小。这是因为随着油速的增加,阻力也会随之增加,壁面会产生较大的剪切应力,从而导致沥青质颗粒在壁面的黏附概率降低,同时也会剥离管壁上已沉积的沥青质。该结论与 ESKIN 等[25]用 Real View 研究计算出油管壁面沥青质厚度的结论一致,沉积能力随着流速的增大而减小。

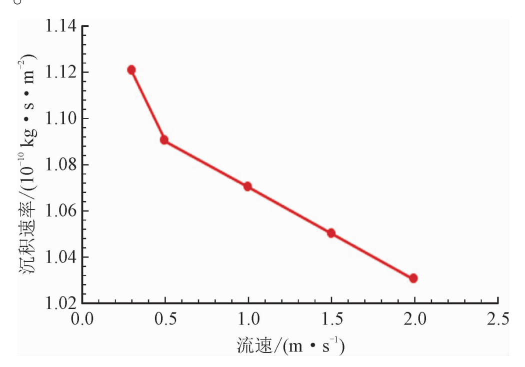


图 12　流速对沉积速率的影响

Fig. 12　The effect of oil velocity on deposition rate

3　结　论

本研究以水平井水平井筒内的液固两相流的基本理论为基础,湍流模型采用 Realizable k-e 模型,固体颗粒的追踪采用 DPM 离散相模块,沥青质聚集颗粒沿入口垂直面均匀注入,速度与油流的速度保持一致。基于流固单向相耦合的方法,模拟了流速 0.3～2.0 m/s 时不同尺寸沥青质颗粒在油管中的沉积。得出结论如下。

1)在层流阶段,沉积百分数和速率随着黏度的增大而减小,这是由于流体的流动平稳,管壁附近的流体梯度低,Saffman 升力减小引起的;湍流时,当原油黏度从 0.001 2 Pa·s 增加至 0.012 Pa·s 时,沉积百分数和沉积速率会随之增大;当原油黏度从 0.012 Pa·s 继续增加至 0.053 Pa·s 时,Re 从 10 103减小至 2 300,致使油管中的原油惯性力减小,因此,沉积速率和沉积百分数会随之下降。

2)在流速恒定时,沥青质颗粒沉积百分数和沉积速率随着颗粒直径的增大而增大,同时通过分析出口粒径颗粒分布得出直径大于 80 μm 的沥青质颗粒大部分都沉积在了管壁,表明颗粒尺寸越大,沉积越严重。

3）当颗粒直径恒定,流速从 0.3 m/s 增加至 2 m/s,沉积概率大概降低了 0.32%,沉积速率减小了 8%。这是因为随着流速、阻力的增加,壁面产生较大的剪切应力,使得壁面颗粒的黏附概率降低,同时也会剥离沉积在管壁的沥青质沉积。

参考文献:

[1]　向敏,宫敬. 管输原油沥青质沉积机理与预测模型[J]. 油气储

运,2010,29(1):1-8.
XIANG Min, GONG Jing. Asphaltene deposition mechanism and prediction model for piped crude oil[J]. Oil & gas storage and transportation,2010,29(1):1-8(in Chinese).

[2] 胡广杰. 塔河油田 TK305 井井筒沥青质沉积防治[J]. 油田化学,2006,23(1):12-14.
HU Guangjie. Asphaletene deposition prevention and treatment using dispersant/stabilizer in production well TK305 of Tahe oilfield [J]. Oilfield chemistry,2006,23(1):12-14(in Chinese).

[3] GUAN Q, YAP Y F, GOHARZADEH A, et al. Integrated one-dimensional modeling of asphaltene deposition in wellbores/pipelines [C]//Proceedings of 2017 7th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO). Piscataway, NJ: IEEE, 2017:1-6.

[4] GUAN Q, GOHARZADEH A, CHAI J C, et al. An integrated model for asphaltene deposition in wellbores/pipelines above bubble pressures[J]. Journal of petroleum science and engineering, 2018, 169:353-373.

[5] 廉培庆,马翠玉,高敏,等. 沥青质沉积特征及控制策略研究进展[J]. 科学技术与工程,2015,15(16):101-107.
LIAN Peiqing, MA Cuiyu, GAO Min, et al. Recent research progress of asphaltene deposition characteristics and control strategies[J]. Science technology and engineering, 2015, 15(16): 101-107 (in Chinese).

[6] ESCOBEDO J, MANSOORI G A. Solid particle deposition during turbulent flow production operations[C]//SPE Production Operations Symposium. Richardson, Texas: OnePetro, 1995: SPE-29488-MS.

[7] RAMIREZ-JARAMILLO E, LIRA-GALEANA C, MANERO O. Modeling asphaltene deposition in production pipelines[J]. Energy & fuels,2006,20(3):1184-1196.

[8] ESKIN D, RATULOWSKI J, AKBARZADEH K, et al. An approach to modeling asphaltene deposition in a turbulent pipe flow on the basis of a Couette device experimental data[C]//Proceedings of the Multi-Scale Modeling Symposium for Industrial Flow Systems. [S. l.]: [s. n.], 2009:7-8.

[9] JAMIALAHMADI M, SOLTANI B, MÜLLER-STEINHAGEN H, et al. Measurement and prediction of the rate of deposition of flocculated asphaltene particles from oil[J]. International journal of heat and mass transfer,2009,52(19/20):4624-4634.

[10] 李兆敏,李爱新,乔辰雨. 沥青质沉积模型的验证和参数分析[C]//2018 油气田勘探与开发国际会议(IFEDC 2018)论文集. 西安:西安石油大学,陕西省石油学会,2018:2892-2900.

[11] SOULGANI B S, REISI F, NOROUZI F. Investigation into mechanisms and kinetics of asphaltene aggregation in toluene/n-hexane mixtures[J]. Petroleum science,2020,17(2):457-466.

[12] SEYYEDBAGHERI H, MIRZAYI B. CFD modeling of high inertia asphaltene aggregates deposition in 3D turbulent oil production wells[J]. Journal of petroleum science and engineering,2017,150: 257-264.

[13] 熊庭,陈芊屹,吴强,等. 基于 Eulerian-Lagrangian 模型的粗颗粒管道输送数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2018,33(4):461-469.
XIONG Ting, CHEN Qianyi, WU Qiang, et al. The numerical simulation on pipeline transport of coarse particles based on Eulerian-Lagrangian model[J]. Chinese journal of hydrodynamics,2018,33(4):461-469(in Chinese).

[14] 刘勇,石雯. 管道横向弯曲振动下液固两相流压强损失研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2019,34(1):115-121.
LIU Yong, SHI Wen. Study on pressure loss of liquid-solid two-phase flow in the pipeline under transverse bending vibration[J]. Chinese journal of hydrodynamics,2019,34(1):115-121(in Chinese).

[15] 张利珍,李运泽,王浚. 气固两相流风洞内颗粒运动特性研究[J]. 系统仿真学报,2007,19(14):3200-3202.
ZHANG Lizhen, LI Yunze, WANG Jun. Study on particle flow character in gas/solid two-phase wind tunnel[J]. Journal of system simulation,2007,19(14):3200-3202(in Chinese).

[16] CHAMOUN H, SCHECHTER R S, SHARMA M M. Hydrodynamic forces necessary to release non-Brownian particles attached to a surface[M]//Oil-Field Chemistry,1989:548-559.

[17] SIPPOLA M R, NAZAROFF W W. Particle deposition from turbulent flow: Review of published research and its applicability to ventilation ducts in commercial buildings[EB/OL]. (2002-06-01) [2022-01-02]. https://www.osti.gov/biblio/815478.

[18] SAFFMAN P G. The lift on a small sphere in a slow shear flow[J]. Journal of fluid mechanics,1965,22(2):385-400.

[19] SAFFMAN P G. The lift on a small sphere in a slow shear flow-corrigendum[J]. Journal of fluid mechanics,1968,31(3):624.

[20] 李蜀涛,魏纳,李海涛,等. 固态流化采掘海洋天然气水合物藏的水平管段固相颗粒运移特征[J]. 天然气工业,2018,38(10):100-106.
LI Shutao, WEI Na, LI Haitao, et al. Migration characteristics of solid-phase particles in horizontal pipes in the exploitation of marine gas hydrate reservoirs through solid fluidization[J]. Natural gas industry,2018,38(10):100-106(in Chinese).

[21] 刘洪涛. 气固两相流中微细颗粒沉积与扩散特性的数值研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.

[22] GAO N P, NIU J L, HE Q B, et al. Using RANS turbulence models and Lagrangian approach to predict particle deposition in turbulent channel flows[J]. Building and environment,2012,48:206-214.

[23] HAN Y L, HU Y M, QIAN F P. Effects of air temperature and humidity on particle deposition[J]. Chemical engineering research and design,2011,89(10):2063-2069.

[24] MALKIN A Y, RODIONOVA G, SIMON S, et al. Some compositional viscosity correlations for crude oils from Russia and Norway [J]. Energy & fuels,2016,30(11):9322-9328.

[25] ESKIN D, RATULOWSKI J, AKBARZADEH K, et al. Modelling asphaltene deposition in turbulent pipeline flows[J]. The Canadian journal of chemical engineering,2011,89(3):421-441.

(编辑 李坤璐)